科学読本

音とオーディオ(5)

平田能睦

5章（その1）音の器

3次元の空間を飛び交いながら減衰してゆく見えない音のようすが「見える」ようになるまでには，室内音響の知識に加えて経験を積み上げてゆかなければなりませんでした．

ここでは，いくつかの実例とその解説を通して，器の中の音を見ていくことにしましょう．

コンサート・ホール

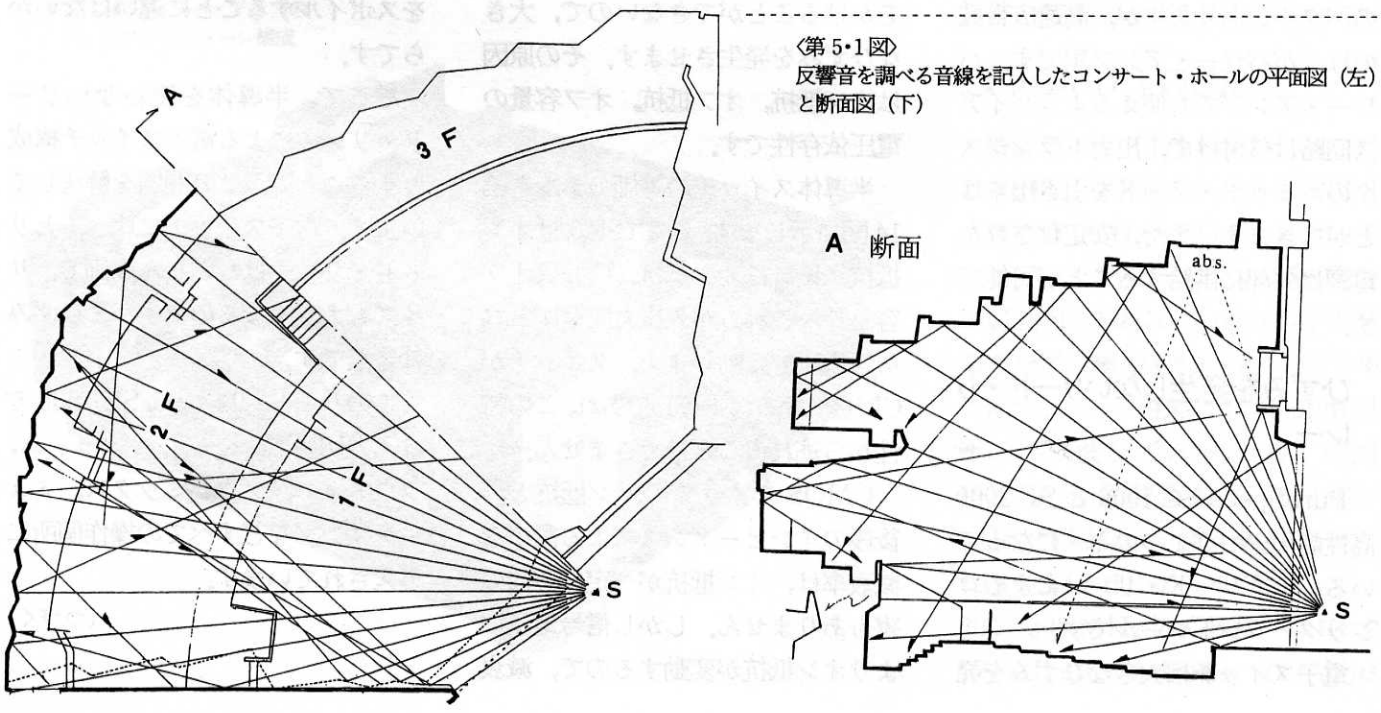
失敗を繰り返しながら技術を習得することは，ものづくりにおいてはめずらしくありません．しかし，コンサート・ホールの音造りは失敗を許されません．ひとたび出来上がるとやり直しのきかないホールは，設計の段階であらゆる検討を行なって，問題がないか調べます．

それでも，ホールが完成して実際に音を聴くまで，確かなことはいえません．残念ながら，最善を尽くしても美しい響きにはならなかったというホールは少なくありません．コンサート・ホールの音響設計はどのように行なわれるのでしょうか．

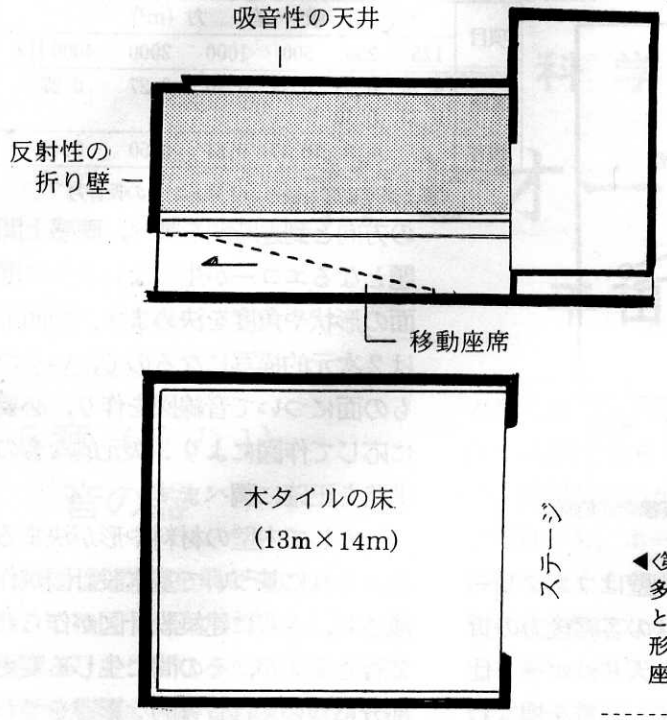
音を測る手段がなにもなかった時代，話のよく聴き取れない講堂を改修するにあたって，耳と時計を使い音の響きを調べたのがセイビン（W. C. Sabine, 1868～1919）です．セイビンの残響時間に関する理論式はいまでも室内音響設計において重要な役割を果しています．ホールの座席や床，壁，天井などの吸音力あるいは吸音率と面積がわかると，ホールの容積を吸音力の総和で割って係数0.16をかければ，これで残響時間が与えられます．

音響材料表にはいろいろな建築材料の吸音率が示されていて，周波数によってその値が変わるので，これらをうまく組み合わせて残響時間が低い周波数から高い周波数までなるべく凹凸のないようにします．残響時間の周波数特性は材料の選びかたによっていくらでも変化しますが，計算好きな人にこの作業は決して退屈ではないでしょう．とはいえ，残響時間の設計をいくらていねいに行なっても，それによって響きのきれいなホールができるわけではありません．

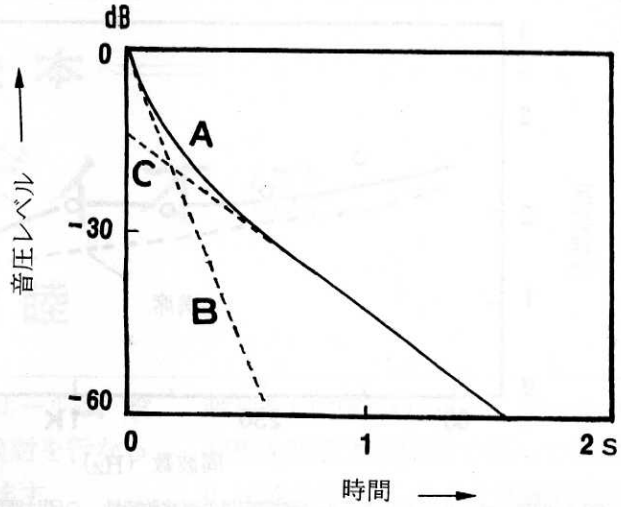
残響時間は，コンサート・ホール



〈第5・1図〉
反響音を調べる音線を記入したコンサート・ホールの平面図（左）と断面図（下）



◀〈第5・3図〉
多目的ホールの断面図（上）と平面図（下）．直方体の室形を活かしたホール．移動座席数は168



▲〈第5・4図〉折れ壁のある室の残響曲線．移動座席に人が入ったときの残響曲線A（2 kHz），3次元的拡散音の減衰B，2次元的拡散音の減衰C

上げ，演奏会場として使うときは移動式の椅子を並べる，というホールですが，このような多目的ホールは床と天井の間でフラッタ・エコー（鳴き竜）が生じやすいので，これを防ぐために天井を吸音性の材料で仕上げます．しかし，こうすることによって，演奏会場として使うときには吸音力が過大になります．そこで，天井を吸音材で仕上げてもコンサート・ホールとして十分な響きを得られるように室形を工夫します．

音響設計というと室の形状を不整形にするのがあたり前のようですが，整形でもふさわしく設計されるなら問題はありません．室形によって響きを保つようにした多目的ホールの設計例をとり上げましょう．

電動式の移動座席を備えた多目的ホールです．天井高は約7 m，観客席の床は幅13 m，長さ14 m，容積1.270 m²の直方体のホールです．床は木タイル，天井は吸音率の大きい材料で仕上げられています．観客席の両側壁と後壁は，上部約5 mがダンピング処理をされたボードによる折り壁，下部2 mは細かい縦リブの入ったボードで仕上げられています．

このような形状によって，天井面に平行に伝搬する音はおもに吸音率の小さい折り壁で反射を繰り返すことになり，この反射音により残響が保たれます．反射音の進みかたが3次元的な拡散音場（反射音場）の音の減衰は座席のないときと座席を並べて聴衆が入ったときで大きく変化するのに対して，2次元的な拡散音場の音の減衰はそれほど大きな変化はありません．

ホール内の音の減衰はこの2つの拡散音場の音の減衰を合成したものになり，対数減衰に折れ曲りが生じますが，聴感上問題になるものではありません．計算による残響時間は満席（168席）のとき2 kHzで1.4秒ですが，不整形にすると0.7秒になります．

折り壁の効果は音線図で調べることができます．ステージから発せられた音が客席後方の壁で反射すると，壁が平坦な場合はステージに戻って，遅れ時間80ミリ秒から100ミリ秒に集中した有害なエコーになりますが，折り壁にした場合はステージに戻る初期反射音はなくなります．

後壁を吸音性にしなくても，適当な形の折り壁にすれば，有害なエコーの発生を防止することができます．

ところで，完成したこのホールで実際に音を聴いた感じはどんなものだったでしょうか．これは朝霞市産業文化センターの多目的ホールですが，この種のホールとしてはとても豊かな気持ちのよい響きをもっていて，さまざまな使用状態において満足できる音響です．フラッタ・エコーはもちろんのこと，ステージに戻って来る有害なエコーはまったくありません．

残響室の特性

残響室に入ると，話はほとんど聴き取ることができません．音響材料の測定に使う残響室は厚さが20 cmほどのコンクリートの壁で造られ，容積は200 m³前後の大きな建物になります．空室のときの残響時間は125 Hzで20秒，500 Hzで

う）に出現する鋭いピークの位置は周波数軸上に等間隔に並びます．

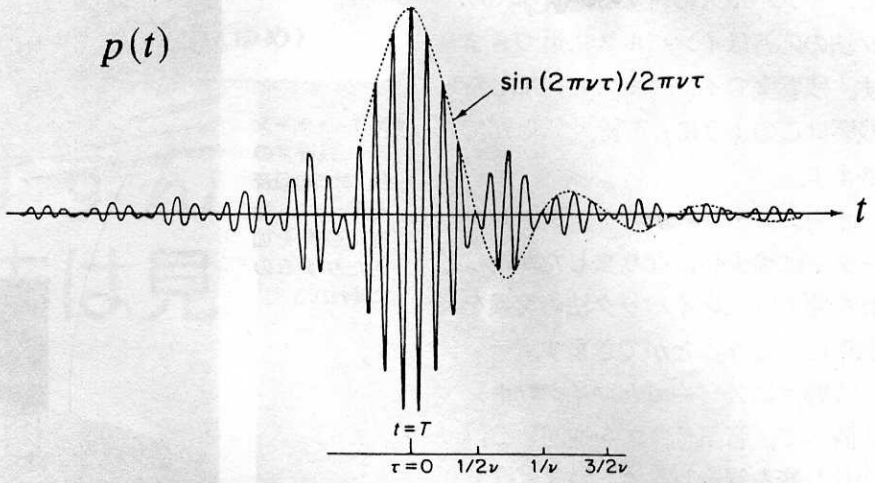
巡回型フィルタをもう１つ接続すると，もう１つの等間隔に並んだピークが加わった周波数特性になります．さらにもう１つ巡回型フィルタを接続すると，さらにもう１つの等間隔に並んだピークが加わった周波数特性になり，一定の周波数帯域幅に生じているピークの数は低い周波数でも高い周波数でも変わりません．

エコー・チャンバーで代表される室内音場の周波数特性を見ると，固有振動のピークの出現は周波数の増加につれて急激に増え，その数はほぼ周波数の３乗に比例します．波形では区別できない残響の音の違いが周波数特性ではっきり識別できるので，このことから聴覚が音を分析して聴いていることがわかります．

デジタル・リバーブレータの開発はこの音の違いが聴き分けられなくなるまで続けられ，自然な響きが得られた時点では遅延回路もかなり複雑な構成になっています．しかし，ケースに入ればそれも見えません．エコー・チャンバーは空っぽですが，リバーブレータの中は遅延回路がぎっしり詰っています．

拡散音場とは?

室内音響の話では，拡散音場という用語がしばしば登場します．拡散（ディフューズ）は気体や液体がどの部分も均一になるように広がることですが，波動である音にこの語が使われるのは興味深いことです．媒質によって定まる速度で伝わる時間的に変動する局所的な圧力が音圧なので，この圧力が均一になっては音が消えてしまいます．それで，拡散音場とはつぎのような音場のことをいいます．



〈第 5・10 図〉 理想的な残響室のインパルス応答音をプレイバック法でふたたび放射して得られる音圧波形 p(t)．インパルス信号の帯域幅 2ν が大きいほど p(t) は中央に集中した波形になる（JSV 98(4), 1985）

(1) ２乗音圧の時間的平均値がどの場所でも等しいこと．

(2) どの場所においても等しい確率であらゆる方向から音波が到来すること．

(1)は音圧分布の測定でわかります．(2)は指向性マイクロホンを使えばわかります．

音場が拡散しているかどうかは，音源から出ている音にも依存します．ランダム雑音でなく純音で生じている音場は，場所によって音圧が大きく変わるので，拡散音場にはなりません．また，ランダム雑音であっても定在波の生じるような低い周波数帯域であるならば，これも拡散音場にはなりません．

さらに，音源の近くも拡散音場から除外されます．コンサート・ホールのように響きがあり，音源の方向がわかる場所では，直接音あるいは音接音と初期反射音を除いた音場を拡散音場と見なすことができます．フラッタ・エコーもブーミングもなく，あらゆる方向から反射音が均一に到来して響きに包まれているようなホールにいると，確かに音はコンサート・ホール全体に拡散しているように感じられます．

残響室に置かれたスピーカからインパルスを出すと長い残響が聴こえ，人の声であれば何を話しているかまったくわかりません．この残響室に吸音材をたくさん持ち込めば，残響は減って話を了解できるようになりますが，吸音材を用いずに残響を除去するにはどうすればよいでしょうか．

スピーカから発せられたインパルス音による残響音をマイクロホンを通してテープ・レコーダに記録し，これを逆回しに再生してスピーカから出し，前述のマイクロホンで収音するという方法で，スピーカからランダム雑音を出したときのマイクロホン位置における音の自己相関関数が簡単に得られることをクットルフは示して，これをプレイバック法と呼びました．拡散音場であれば，クットルフの実験結果は理論的に与えることができます．

中心周波数 f_0，帯域幅 $f_0/4$ のバンドパス・フィルタを通したインパルスを拡散音場となる残響室に放射したときのプレイバック法によるマイクロホン出力の理論波形は，たとえば f_0 を 1 kHz とすると，帯域幅 2ν は 250 Hz となり，中央部分の山の幅 $1/\nu$ は８ミリ秒になります．山の幅は帯域 2ν を拡げると狭まるの

で，インパルスに対するプレイバック法の応答はインパルスに近づきます．残響室でインパルスに付加した残響はこのようにして除くことができます．

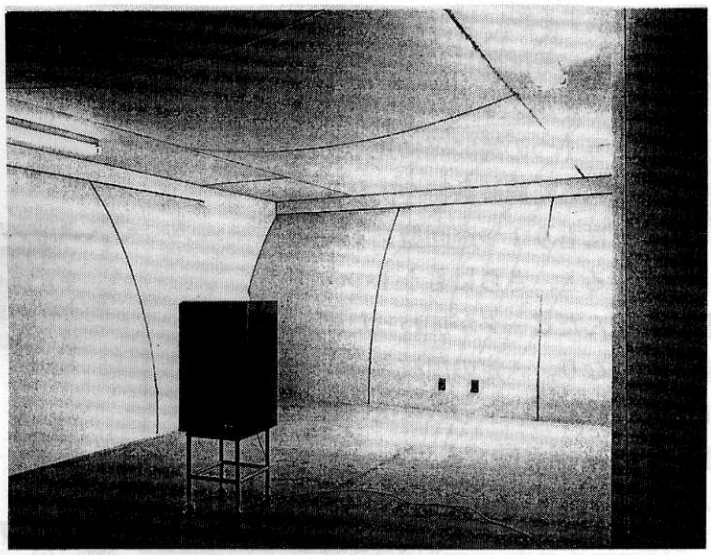
オープン・リールのテープ・レコーダーは稀少品になりましたが，これを使えばプレイバック法の実験を簡単に行なうことができます．

残響室にスピーカとマイクロホンを置いて，音楽テープを逆回しで再生した音を録音します．つぎに録音された音をふたたび逆回しで再生し，上記のマイクロホンで収音しますが，比較のために 50 cm ほどマイクロホンの位置をずらした場所の音も収音してみます．

これで録音された音楽の時間方向は正常になりますが，音はどうなるでしょうか．マイクロホンをずらして収音したものは何の音かまったくわかりません．しかし，所定位置で収音した音は決してハイファイではありませんが，残響が除かれた音楽になりました．理論上はプレイバック法によって残響室の1点でランダム雑音の音圧を高めることができ，拡散音場に特異な点を生じさせることができます．

プレイバック法はレバベレータを使って行なえるので，リアル・タイムにはなりませんが，1つの秘話方式になります．

広い海ではさまざまなところでさまざまな波が発生して周囲に拡がっています．砂浜はそうした波の終着駅で，海辺で眺めている人にとって波の来る方向はいつも同じです．しかし，遠く広がる大洋の中では時間を引き延ばした拡散音場のように，あらゆる方向からさまざまな波が進んで来ます．もしも，そうした波の位相が偶然に一致して重なり合うなら局所的に巨大な波が発生することになります．広大な海でそのような巨大な波が生じても，長くは続かずまた遠方に伝わる波ではないので，人の目に触れることはめったにないでしょう．



●エコー・チャンバー/残響室の例．材料の吸音を測ったり，録音に残響を加えたりするのに使われる

とはいえ，船乗りの冒険談として片づけられる話には，大型船をのみ込むような怪物波（モンスター・ウェーブ）が出てきます．衛星から撮影した海洋のレーダー写真の調査では，3週間に少なくとも 10 回の怪物波が見つかっていて，そのような波にはほぼ垂直にそそり立つ 40 m の高さになるものがあるということです．

逆転再生によってあらゆる方向から来る一群の波の位相を揃え，拡散音場の海で重ね合わせたとすれば，そこに巨大な波が発生することでしょう．

5章のキー・ワード(1)

●残響時間

室内に置かれた音源スピーカから雑音を出して時刻 t＝0 で音源を停止すると，響きの多いところでは残響音がよく聴き取れます．

減衰して行く残響の音の強さを対数で表わした減衰曲線（対数減衰曲線）を直線で近似して，t＝0 のときの音圧レベルが－60 dB（音の強さが 100 万分の1）になるまでの時間を残響時間と定義します．実際に測定する場合は，雑音の影響を避けて－40 dB 前後までの減衰曲線の傾斜から残響時間を推定します．

●無響室

壁，床，天井を吸音材料で覆い，反射音が生じないようにした無響室は，音響計測器メーカーやオーディオ・メーカーはもちろんのこと，建設会社や自動車会社など，音の研究を必要とするところには大小を問わずほとんど備えられています．

初めて無響室に入ると，誰もが反射音のない空間の違和感に一瞬息を呑み，あたりを見回し，やがて笑顔に戻ります．それは雪の深く積もった朝のシーンとした感じに近いかもしれません．

慣れた人はこのシーンとする度合いで無響室の性能をある程度判断できますが，正確に判断するためには，無響室に音源のスピーカを置いて，音源からの距離の2乗に反比例して音の強さが減衰する様子を調べます．この逆2乗特性と呼ばれる音圧減衰特性は，100 Hz 以下の低い周波数になると，背部の軀体コンクリート壁からの反射音の影響によってゆがんできます．これは耳ではわかりません．